

SAŽETAK

Zbog potreba tržišta, brodovi se grade sve veći i sve brži. Istovremeno, brodske konstrukcije se optimiziraju sve preciznije i u upotrebu ulaze novi materijali. Zbog svega toga krutost suvremenih brodova se smanjuje, a susretne frekvencije povećavaju pa postoji realna opasnost od preklapanja prirodnih frekvencija broskog trupa i onih valne uzbude. Taj je problem osobito izražen kod brodova s velikim palubnim otvorima kao što su kontejnerski brodovi. Zbog otvorenog presjeka i male krutosti elastične deformacije konstrukcije su vrlo velike, a prirodne frekvencije toliko niske da je energija valova dovoljna za pobuđivanje rezonantnih vibracija. Takva situacija izlazi iz iskustvenih okvira i nije predviđena postojećim pravilima klasifikacijskih društava. Zbog toga je nužno provesti hidroelastičnu analizu takvih brodova.

Ovaj rad obuhvaća hidroelastičnu analizu jednog velikog kontejnerskog broda nosivosti 11400 TEU. Matematički model obuhvaća strukturni, hidrostatički i hidrodinamički podmodel koji se sklapaju u hidroelastični model. Određuju se prirodni oblici vibriranja prema teoriji grede koji uključuje utjecaj smika na torziju. Analizira se utjecaj poprečnih pregrada na torziju. Pouzdanost 1D FEM modela se provjerava usporedbom tako izračunatih prirodnih oblika vibriranja broda u zraku s onim izračunatim uz korištenje 3D FEM modela. Razunaju se prijenosne funkcije i odziv broda za različite kuteve nailaska valova i različite valne frekvencije.

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	3
POPIS TABLICA.....	4
POPIS OZNAKA	5
1. UVOD.....	7
2. GLAVNE DIMENZIJE ZADANOG BRODA.....	8
3. STRUKTURNI MODEL	11
3.1. Model kona nih elemenata.....	11
3.2. Geometrijske zna ajke presjeka.....	16
3.2.1. Karakteristike presjeka dobivene programom STIFF.....	16
3.2.2. Utjecaj popre nih pregrada na krutost broskog trupa.....	18
3.3. Inercijske zna ajke broda	22
3.4. Prirodni oblici vibriranja u zraku	26
4. HIDROSTATI KI MODEL.....	28
4.1. Hidrostatika krutost	28
4.2. Gravitacijska krutost	29
4.3. Povratna krutost	30
5. HIDRODINAMI KI MODEL	31
5.1. Teoretski pregled	31
5.2. Mreža hidrodinami kog modela	33
5.3. Sprezanje strukturnog i hidrodinami kog modela	34
6. HIDROELASTI NI MODEL.....	35
7. PRORA UN PRIJENOSNIH FUNKCIJA.....	36
8. PRORA UN ODZIVA ZA ODRE ENO STANJE MORA	38
9. ZAKLJU AK	40
10. POPIS LITERATURE.....	41

POPIS SLIKA

Slika 2.1 Op i plan broda

Slika 2.2 Glavno rebro

Slika 3.1.1 Savijanje i torzija grede

Slika 3.1.2 Gredni kona ni element

Slika 3.2.2.1 Deformacija pregrade

Slika 3.3.1 Raspodjela mase nakrcanog broda

Slika 3.3.2 Vertikalni položaj težišta nakrcanog broda

Slika 3.3.3 Raspodjela polarnog momenta tromosti nakrcanog broda s obzirom na centar torzije

Slika 3.3.4 Raspodjela momenta tromosti mase nakrcanog broda s obzirom na os y

Slika 3.3.5 Raspodjela momenta tromosti mase nakrcanog broda s obzirom na os z

Slika 3.3.6 Raspodjela bimomenta tromosti mase nakrcanog broda

Slika 5.2.1 Hidrodinami ka mreža prikazana u programu MG V (Mesh Generation&Visualisation)

Slika 5.3.1 Koordinatni sustavi strukturnog i hidrodinami kog modela

Slika 7.1 Prijenosna funkcija horizontalnog momenta savijanja

Slika 7.2 Prijenosna funkcija momenta torzije

Slika 7.3 Prijenosna funkcija vertikalnog momenta savijanja

Slika 8.1 Raspodjela vertikalnog momenta savijanja po duljini broda.

Slika 8.2 Raspodjela horizontalnog momenta savijanja po duljini broda

POPIS TABLICA

Tablica 3.2.1.1 Geometrijske karakteristike presjeka broda

Tablica 3.2.2.1 Energija deformiranja pregrada

Tablica 3.2.2.2 Ekvivalentni faktori krutosti na uvijanje za poprečne presjeke broda

Tablica 3.4.1. Usporedba prirodnih oblika vibracija u zraku za 1D i 3D FEM model

POPIS OZNAKA

A_{ij}	koeficijent dodane mase
A_s	smi na površina
B_{ij}	koeficijent prigušenja
B_w	bimoment vitoperenja
C_{ij}	povratni koeficijent
E	modul elasti nosti
F	sila
G	modul smika
I_b	moment inercije presjeka
I_t	moment otpora torzije
I_w	moment otpora vitoperenja
i	imaginarna jedinica
M	moment savijanja
S	površina
T	moment torzije
U	energija deformiranja
u	aksijalni pomak
\bar{u}	funkcija vitoperenja
v	brzina broda
w	progib
x,y,z	Kartezijeve koordinate
Z	koordinata oplakane površine
A	modalna dodana masa
B	prigušenje
C	povratna krutost
H	vektor deformacija
h	vektor oblika
i,j,k	jedini ni vektori
K	matrica krutosti
k	modalna krutost
M	matrica masa
m	modalna masa

N	vektor normale
n	jedini ni vektor normale
	vektor pomaka
ν	kut uvijanja
	Poissonov koeficijent
	modalni koeficijent
	gusto a
	potencijal brzine
	valna frekvencija

1. UVOD

Zbog potreba tržišta, brodovi se grade sve veći i sve brži. Istovremeno, brodske konstrukcije se optimiziraju sve preciznije i u upotrebu ulaze novi materijali. Zbog svega toga krutost suvremenih brodova se smanjuje, a susretne frekvencije povećavaju pa postoji realna opasnost od preklapanja prirodnih frekvencija broskog trupa i onih valne uzbude. Taj je problem osobito izražen kod brodova s velikim palubnim otvorima kao što su kontejnerski brodovi. Zbog otvorenog presjeka i male krutosti elastične deformacije konstrukcije su vrlo velike, a prirodne frekvencije toliko niske da je energija valova dovoljna za pobuđivanje rezonantnih vibracija. Takva situacija izlazi iz iskustvenih okvira i nije predviđena postojećim pravilima klasifikacijskih društava. [1]

Kako bi se poboljšala klasifikacijska pravila i osigurala veća sigurnost brodova na moru, potrebno je obratiti pažnju na hidroelastični odziv velikog kontejnerskog broda na valovima. Klasični pristup analizi odziva broda polazi od pretpostavke da se brod ponaša kao kruto tijelo. Kod velikih kontejnerskih brodova takva pretpostavka nije prihvatljiva zbog međudjelovanja istovremenih gibanja i deformacija koje u ovom slučaju nisu zanemarive. Zbog toga analizu valnog opterećenja i vibracija broda treba rješavati kao spregnuti hidroelastični problem.

Postupak primijenjen u hidroelastičnoj analizi započinje definiranjem strukturnog modela, rasporeda mase i geometrijskog modela oplakane površine. Proračunavaju se prirodni oblici vibriranja u zraku, modalna krutost i modalna masa, prigušenje i valno opterećenje. Konačno, određuju se prirodne vibracije u vodi i prijenosne funkcije za određivanje odziva na valnu uzbudu. [2]

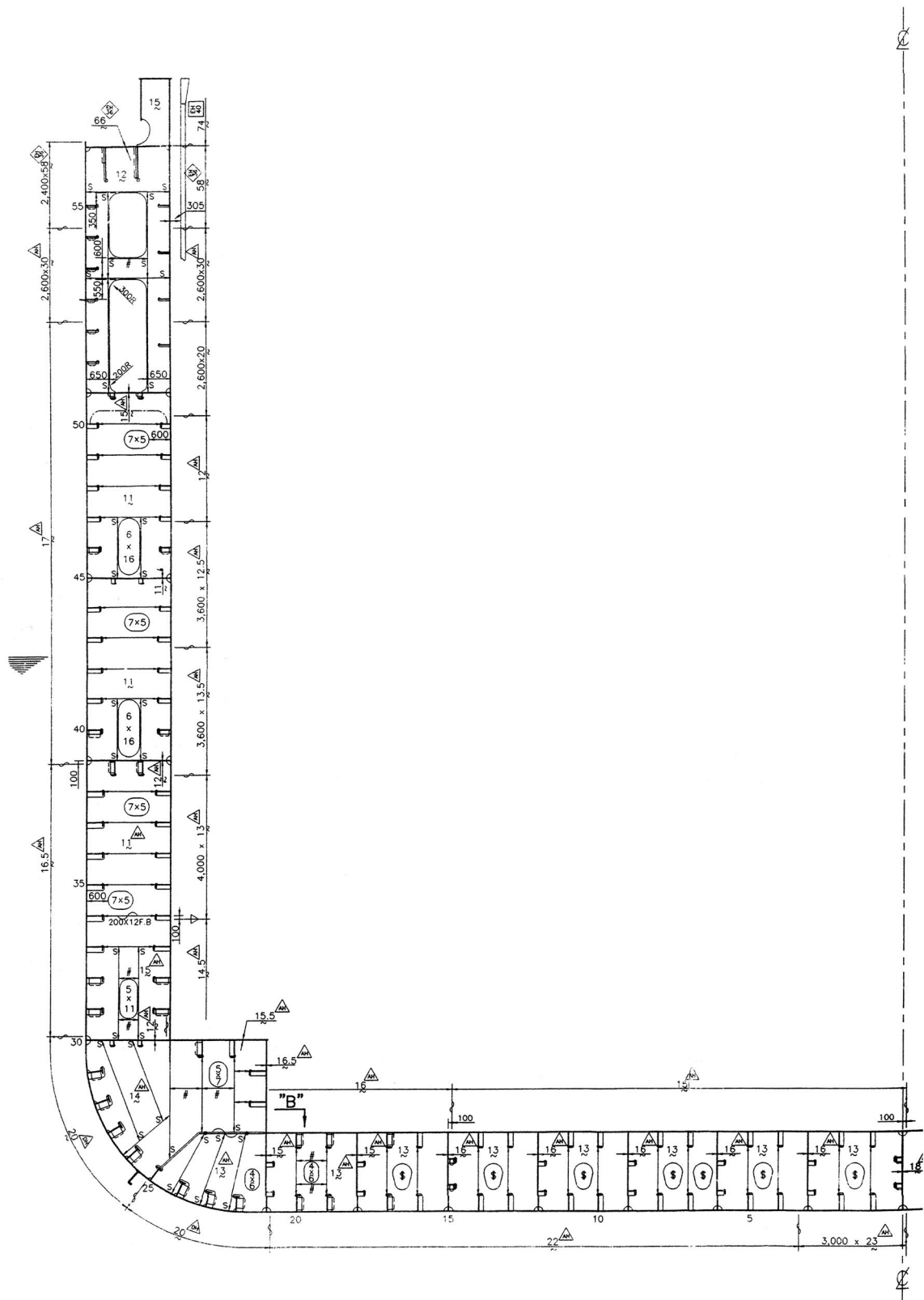
2. GLAVNE DIMENZIJE ZADANOG BRODA

Zadan je vrlo veliki kontejnerski brod (VLCS) nosivosti 11400 TEU, sljede ih zna ajki:

Duljina preko svega	$L_{oa} = 363,44 \text{ m}$
Duljina izme u okomica	$L_{pp} = 348 \text{ m}$
Širina	$B = 45,60 \text{ m}$
Visina	$H = 29,74 \text{ m}$
Gaz	$T = 15,5 \text{ m}$
Istisnina, natovaren brod	$D_f = 171445 \text{ t}$
Istisnina, balast	$D_b = 74977 \text{ t}$
Istisnina, laki brod	$D_l = 37151 \text{ t}$
Snaga motora	$P = 72240 \text{ t}$
Brzina	$v = 24,7 \text{ v}$

Slika 2.1 prikazuje op i plan zadanog broda, a Slika 2.2 njegovo glavno rebro.

Slika 2.1 Op i plan broda



Slika 2.2 Glavno rebro

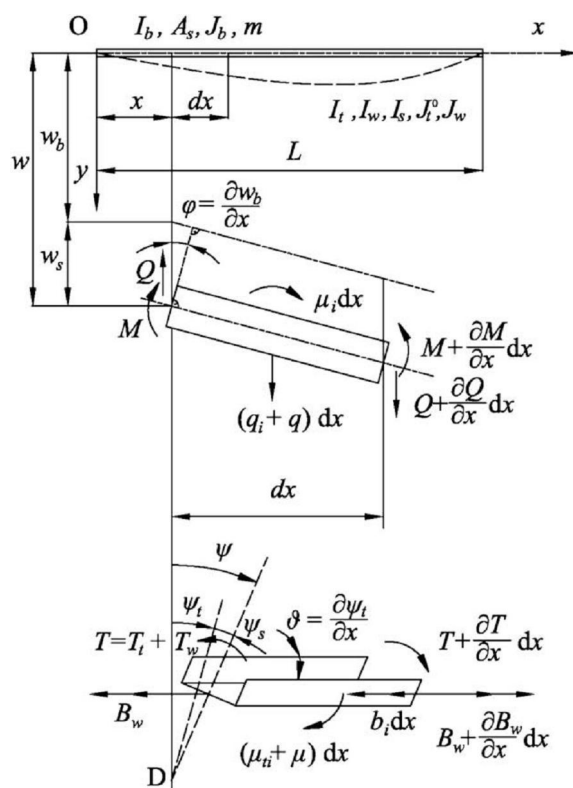
3. STRUKTURNI MODEL

3.1. Model kona nih elemenata

Kod brodova s otvorenim presjekom, kao što su kontejnerski brodovi, ne može se zanemariti udaljenost između centra gravitacije i centra torzije koji se ponekad može nalaziti i izvan trupa. Stoga nije moguće odvojeno analizirati horizontalne i torzijske vibracije. Za analizu spregnutih vibracija potreban je i odgovarajuće dovoljno složen strukturni model. Dobri rezultati se postižu ako se taj model temelji na teoriji tankostijenih nosača. Takav strukturni model koristi gredne elemente s osam stupnjeva slobode gibanja uključujući savijanje, smicanje, uvijanje i vitoperenje.

Ukupni progib grede se sastoji od progiba savijanja w_b i progiba smika w_s .

$$w = w_b + w_s$$



Slika 3.1.1 Savijanje i torzija grede [3]

Smikni progib ovisi o progibu savijanja, kao i kut zakreta presjeka.

$$w_s = -\frac{EI_b}{GA_s} \frac{\partial^2 w_b}{\partial x^2}$$

$$\varphi = \frac{\partial w_b}{\partial x}$$

E – modul elastičnosti

G – modul smika

I_b – moment inercije

A_s – smična površina presjeka

Sile koje djeluju na presjek su moment savijanja i smična sila:

$$M = -EI_b \frac{\partial^2 w_b}{\partial x^2}$$

$$Q = GA_s \frac{\partial w_s}{\partial x} = -EI_b \frac{\partial^3 w_b}{\partial x^3}$$

Opterećenje se sastoji od kontinuiranog poprečnog opterećenja q_i i momenta savijanja μ_i i za slučaj spregnutih horizontalnih i torzijskih vibracija može se izraziti kao:

$$q_i = -m \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + c \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \right)$$

$$\mu_i = -J_b \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}$$

m – distribuirana masa broda i dodana masa

J_b – moment inercije mase broda oko osi z

c – udaljenost težišta od centra torzije

Analogno savijanju, ukupni kut uvijanja se sastoji od istog kuta torzije φ_t i smičnog kuta φ_s gdje kut smika ovisi o kutu torzije.

$$\psi = \psi_t + \psi_s$$

$$\psi_s = -\frac{EI_w}{GI_s} \frac{\partial^2 \psi_t}{\partial x^2}$$

I_w – moment otpora vitoperenja

I_s – smi ni moment inercije

Drugi pomak grede koji uzrokuje vitoperenje je funkcija istog kuta torzije ϑ :

$$\vartheta = \frac{\partial w_t}{\partial x}$$

Sile koje djeluju na element grede su isti moment torzije T_t , moment vitoperenja T_w i bimoment vitoperenja B_w . Isti moment torzije i moment vitoperenja daju ukupni moment uvijanja T .

$$T = T_t + T_w$$

$$T_t = GI_t \frac{\partial \psi_t}{\partial x}$$

$$T_w = GI_s \frac{\partial \psi_s}{\partial x} = -EI_w \frac{\partial^3 \psi_t}{\partial x^3}$$

$$B_w = EI_w \frac{\partial^2 \psi_t}{\partial x^2}$$

Opterećenje se sastoji od distribuiranog momenta uvijanja μ_{ii} i bimomenta b_i u sljedećem obliku:

$$\mu_{ii} = -J_t \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} - mc \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}$$

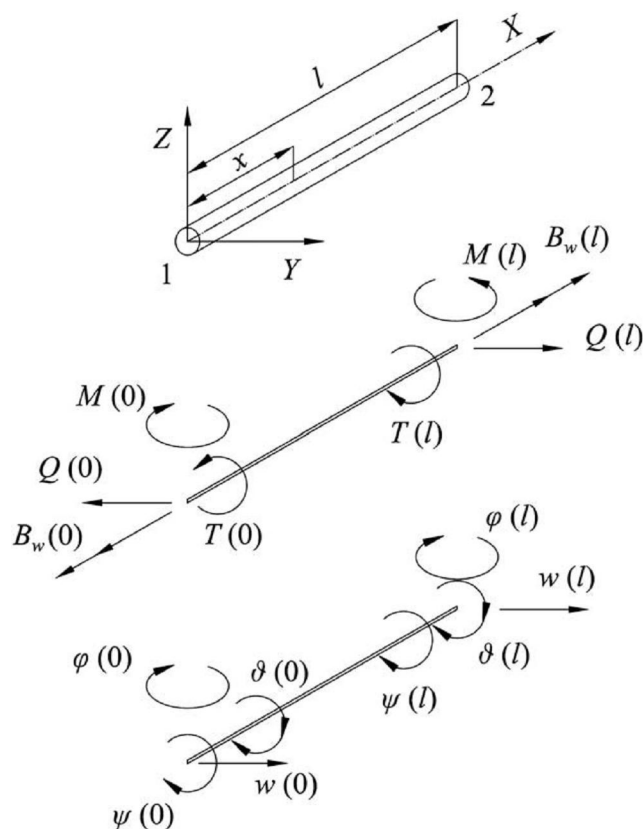
$$b_i = -J_w \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial t^2}$$

J_t – polarni moment inercije broda i dodane mase oko centra torzije

J_w – bimoment inercije mase broda oko centra vitoperenja

Budući da greda ima četiri pomaka, w , ψ , ϑ , konačni element s dva čvora ima osam stupnjeva slobode gibanja. Vektori pomaka za smik i savijanje i torziju i vitoperenje:

$$\{U\} = \begin{Bmatrix} w(0) \\ \varphi(0) \\ w(l) \\ \varphi(l) \end{Bmatrix} \quad \{V\} = \begin{Bmatrix} \psi(0) \\ \vartheta(0) \\ \psi(l) \\ \vartheta(l) \end{Bmatrix}$$



Slika 3.1.2 Gredni kona ni element [3]

Vektori pomaka za smik i savijanje i torziju i vitoperenje:

$$\{U\} = \begin{Bmatrix} w(0) \\ \varphi(0) \\ w(l) \\ \varphi(l) \end{Bmatrix} \quad \{V\} = \begin{Bmatrix} \psi(0) \\ \vartheta(0) \\ \psi(l) \\ \vartheta(l) \end{Bmatrix}$$

Vektori vrnih sila:

$$\{P\} = \begin{Bmatrix} -Q(0) \\ M(0) \\ -Q(l) \\ M(l) \end{Bmatrix} \quad \{R\} = \begin{Bmatrix} -T(0) \\ -B_w(0) \\ T(l) \\ B_w(l) \end{Bmatrix}$$

Vektori smi nog i torzijskog optere enja:

$$\{q\} = \left\{ \int_0^1 q w_j dx \right\} \quad \{\mu\} = \left\{ \int_0^1 \mu \psi_j dx \right\}$$

$$i, j = 1, 2, 3, 4$$

Matri na jednadžba kona nog elementa glasi [3]:

$$\{f\} = [k]\{\delta\} + m\{\ddot{\delta}\} - \{f\}_{q\mu}$$

$$\{f\} = \begin{Bmatrix} P \\ R \end{Bmatrix}$$

$$\{f\}_{q\mu} = \begin{Bmatrix} q \\ \mu \end{Bmatrix}$$

$$\{\delta\} = \begin{Bmatrix} U \\ V \end{Bmatrix}$$

$$[k] = \begin{bmatrix} k_{bs} & 0 \\ 0 & k_{ws} + k_t \end{bmatrix}$$

$$[m] = \begin{bmatrix} m_{sb} & m_{st} \\ m_{ts} & m_{tw} \end{bmatrix}$$

k_{bs} – matrica krutosti na savijanje i smik

k_{wt} – matrica krutosti na vitoperenje i torziju

m_{sb} – matrica mase za smik i savijanje

m_{tw} – matrica mase za torziju i vitoperenje

$m_{st} = m_{ts}^T$ – matrica mase za smik i torziju

Spregnute horizontalne i torzijske vibracije se o ituju u matrici mase zbog udaljenosti centra torzije od težišta. Sve vrijednosti pridružene elementima je potrebno transformirati iz lokalnog u globalni koordinatni sustav.

3.2. Geometrijske značajke presjeka

3.2.1. Karakteristike presjeka dobivene programom STIFF

Za što to nije strukturni model potrebno je odrediti geometrijske značajke što veći broj presjeka. U ovom slučaju u obzir su uzeta 33 presjeka. Budući da se kod kontejnerskog broda izmjenjuju otvoreni i zatvoreni presjeci potrebno je zadati bar tri presjeka za svaki pojedini otvoreni ili zatvoreni dio jer se geometrijske značajke prenose sa zadanih presjeka na konačne elemente polinomskom interpolacijom trećeg do petog stupnja [4]. Geometrijske značajke koje treba zadati u ulaznoj kartici programa DYANA za analizu vibracija su [5]:

- površina poprečnog presjeka
- horizontalna smična površina
- faktor krutosti na uvijanje
- moment tromosti površine presjeka oko poprečne osi
- moment tromosti površine poprečnog presjeka oko vertikalne osi
- faktor krutosti na vitoperenje
- vertikalni položaj centra torzije
- vertikalni položaj neutralne linije vertikalnog savijanja

Za otvorene presjeke zadaje se još i modul tromosti smika i u posebnoj kartici razdioba funkcije vitoperenja po oplakanoj površini trupa. Rezultati proračuna karakteristika presjeka programom STIFF su prikazani u sljedećoj tablici.

Tablica 3.2.1.1 Geometrijske karakteristike presjeka broda

	x, m	A, m ²	F _y , m ²	F _z , m ²	I _t , m ⁴	I _y , m ⁴	I _z , m ⁴	I _w , m ⁶	z _{sc} , m	z ₀ , m	I _s , m ⁴
frame -4	2,00	3,497	1,925	0,473	129,20	54,90	639,5	3943,0	17,54	19,29	0,00
frame 0	5,20	3,817	2,019	0,541	144,90	62,15	685,5	4672,0	17,13	18,86	0,00
frame 8	11,60	4,005	1,971	0,633	169,50	73,64	743,4	5557,0	16,70	18,38	0,00
frame 13_aft	15,60	4,579	1,985	0,827	191,80	121,50	1010,0	13350,0	15,08	19,02	0,00
frame 13_fore	15,60	3,371	1,253	0,572	10,69	107,30	883,9	24970,0	7,06	17,98	339,17
frame 17	28,24	4,548	1,053	0,896	17,53	259,60	1068,0	36310,0	4,53	14,99	387,85
frame 22	42,88	5,009	1,115	1,025	30,64	383,30	1224,0	51640,0	-0,77	13,92	476,72
frame 27	57,52	5,682	1,229	1,164	51,12	516,60	1411,0	76630,0	-4,66	12,94	523,95
frame 32_aft	72,16	5,934	1,165	1,268	27,29	625,90	1587,0	100600,0	-9,14	12,62	606,11
frame 32_fore	72,16	7,577	2,399	1,813	890,90	820,60	1722,0	21330,0	10,76	15,13	0,00
frame 40	77,96	7,983	2,610	1,946	976,20	873,20	1807,0	19740,0	9,49	14,74	0,00
frame 50	85,96	9,517	3,048	2,104	1072,00	1026,00	2106,0	25740,0	9,20	13,83	0,00
frame 59_aft	94,57	7,596	2,593	1,461	1083,00	961,10	2114,0	33990,0	7,10	14,00	0,00
frame 59_fore	94,57	6,220	1,035	1,495	14,33	824,30	2012,0	185400,0	-14,22	13,83	757,71
frame 64	113,22	6,757	1,056	1,559	17,04	947,20	2256,0	250100,0	-15,05	13,58	833,56
frame 69	131,87	6,939	1,061	1,610	17,63	1007,00	2371,0	296100,0	-15,58	13,48	911,23
frame 74	150,52	7,035	1,060	1,619	18,64	1030,00	2413,0	309400,0	-15,60	13,44	922,33
frame 79	166,77	7,049	1,056	1,604	20,20	1040,00	2428,0	321500,0	-15,61	13,36	927,05
frame 84	185,42	7,049	1,056	1,604	20,20	1040,00	2428,0	321500,0	-15,61	13,36	927,05
frame 89	204,07	6,958	1,044	1,594	17,80	1023,00	2377,0	302700,0	-15,77	13,54	905,74
frame 94	222,72	7,203	1,142	1,716	19,14	1026,00	2418,0	284500,0	-14,89	13,35	878,82
frame 99	238,96	6,698	1,108	1,600	18,73	899,00	2131,0	204500,0	-13,90	13,21	738,10
frame 104	253,40	6,270	1,067	1,508	20,16	771,60	1862,0	129500,0	-12,36	13,15	596,39
frame 109	267,84	5,797	1,039	1,441	19,66	641,80	1544,0	69420,0	-10,30	13,00	413,98
frame 114	282,28	5,271	0,927	1,324	20,31	531,60	1199,0	27420,0	-7,79	13,19	243,39
frame 119	296,72	5,156	0,833	1,295	20,75	479,70	984,0	10060,0	-4,31	14,05	244,13
frame 124	311,16	4,997	0,661	1,223	23,61	453,90	766,8	11480,0	0,10	15,94	256,97
frame 129	325,60	4,581	0,787	1,076	39,88	341,90	554,7	6288,0	8,73	17,75	199,48
frame 133_aft	338,24	3,656	0,868	0,972	24,65	267,00	369,6	1834,0	14,69	18,76	112,16
frame 133_fore	338,24	4,498	2,129	1,047	118,10	312,00	375,6	1332,0	21,70	20,11	0,00
frame 141	344,64	3,180	1,512	0,733	70,17	238,40	230,5	958,5	22,04	19,69	0,00
frame 149	351,04	2,902	1,227	0,802	46,40	236,90	159,0	1099,0	22,77	19,88	0,00
frame 157	357,44	1,958	0,896	0,043	20,47	52,83	70,3	571,7	15,10	13,31	0,00

3.2.2. Utjecaj poprečnih pregrada na krutost broskog trupa

U inak poprečnih pregrada na trup se izražava odgovarajućim povećanjem faktora krutosti na uvijanje. Taj se faktor povećava proporcionalno energiji deformiranja pregrade. Pregrada se smatra ortotropnom plohom s jakom kutijom pregrade (stoolom) na vrhu, a energija deformiranja se određuje tako da se vitoperenje koje uzrokuje zakretanje i savijanje pregrade nametne kao rubni uvjet [6].

Uzdužni pomak pregrade se izražava kao:

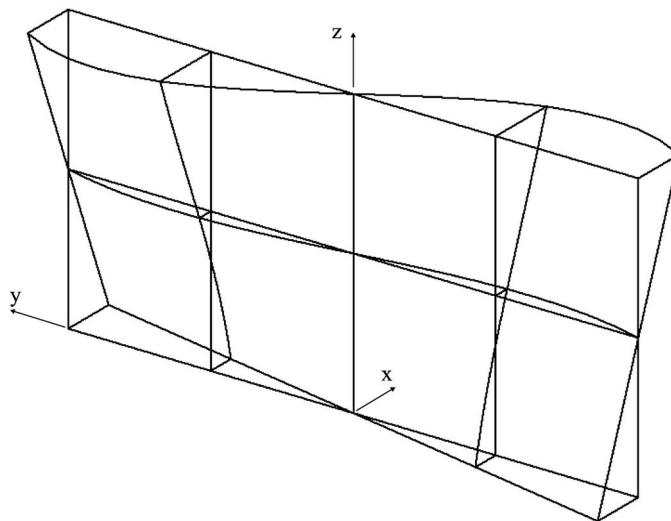
$$u(y, z) = -y \left\{ (z - d) + \left[1 - \left(\frac{y}{b} \right)^2 \right] \frac{z^2}{H} \left(2 - \frac{z}{H} \right) \right\} \psi'$$

H – visina broda

b – poluširina pregrade

d – udaljenost centra vitoperenja od neutralne linije dvodna

ψ' – varijacija kuta uvijanja



Slika 3.2.2.1 Deformacija pregrade [6]

Energija deformiranja roštilja pregrade uključuje vertikalno i horizontalno savijanje, kontrakciju i uvijanje:

$$U_g = \frac{1}{1-\nu^2} \left[\frac{116H^3}{35b} i_y + \frac{32b^3}{105H} i_z + \frac{8Hb}{75} \nu (i_y + i_z) + \frac{143Hb}{75} (1-\nu) i_t \right] E \psi'^2$$

i_y – srednji moment tromosti presjeka oko poprečne osi po jedinici širine

i_z – srednji moment tromosti presjeka oko vertikalne osi po jedinici širine

i_t – srednji faktor krutosti na uvijanje po jedinici širine

Energija deformiranja kutije pregrade uključuje savijanje, smik i uvijanje:

$$U_s = \left[\frac{12h^2 I_{sb}}{b} + 72(1+\nu) \frac{h^2 I_{sb}^2}{b^3 A_s} + \frac{9b I_{st}}{10(1+\nu)} \right] E \psi'^2$$

I_{sb} – moment tromosti presjeka

A_s – smična površina

I_{st} – faktor krutosti na uvijanje

h – udaljenost neutralne linije od pokrova dvodna

Formula za ekvivalentni faktor krutosti [6]:

$$I_t^* = \left[1 + \frac{a}{l_1} + \eta_e \frac{4(1+\nu)C}{I_t l_0} \right] I_t$$

a – visina struka nosa a pregrade

l_0 – razmak pregrada

$l_1 = l_0 - a$ – isti razmak

η_e – koeficijent uinkovitosti

$$C = \frac{U_g + U_s}{E \psi'} - \text{koeficijent energije}$$

Drugi član u izrazu za ekvivalentni faktor krutosti predstavlja doprinos pregrade kao zatvorenog presjeka, a treći član energiju deformiranja pregrade. Koeficijent uinkovitosti η_e uzima u obzir popuštanje oslonca pregrade, a može se izraziti kao omjer kuta zakreta na granici kutije pregrade i globalnog kuta zakreta palube.

Energija deformiranja roštilja i kutije pregrade se dobivaju prema ranije navedenim formulama, a ukupna energija kao njihov zbroj. Dobivene vrijednosti za propusnu i nepropusnu pregradu su pokazane u tablici:

Tablica 3.2.2.1 Energija deformiranja pregrada

Pregrada	Ortotropna ploča	Kutija	Ukupno
	$U/[E \cdot]$	$U/[E \cdot]$	$U/[E \cdot]$
Propusna	11.059	60.437	71.496
Nepropusna	22.248	60.437	82.885

Budući da se kod kontejnerskog broda propusne i nepropusne pregrade pravilno izmjenjuju, energija deformiranja za određivanje ekvivalentnog faktora krutosti na uvijanje se uzima kao srednja vrijednost energije propusne i nepropusne pregrade.

$$I_t^* = 1,1424I_t + 15,2885$$

Faktor krutosti izrađunat za presjeke programom STIFF i ekvivalentni faktor krutosti su prikazani u Tablici 3.2.2.2.

Tablica 3.2.2.2 Ekvivalentni faktori krutosti na uvijanje za poprečne presjeke broda

	x, m	I_t , m ⁴	I_t^* , m ⁴
frame -4	2,00	129,20	129,20
frame 0	5,20	144,90	144,90
frame 8	11,60	169,50	169,50
frame 13_aft	15,60	191,80	191,80
frame 13_fore	15,60	10,69	27,50
frame 17	28,24	17,53	35,31
frame 22	42,88	30,64	50,29
frame 27	57,52	51,12	73,69
frame 32_aft	72,16	27,29	46,46
frame 32_fore	72,16	890,90	890,90
frame 40	77,96	976,20	976,20
frame 50	85,96	1072,00	1072,00
frame 59_aft	94,57	1083,00	1083,00
frame 59_fore	94,57	14,33	31,66
frame 64	113,22	17,04	34,75
frame 69	131,87	17,63	35,43
frame 74	150,52	18,64	36,58
frame 79	166,77	20,20	38,36
frame 84	185,42	20,20	38,36
frame 89	204,07	17,80	35,62
frame 94	222,72	19,14	37,15
frame 99	238,96	18,73	36,69
frame 104	253,40	20,16	38,32
frame 109	267,84	19,66	37,75
frame 114	282,28	20,31	38,49
frame 119	296,72	20,75	38,99
frame 124	311,16	23,61	42,26
frame 129	325,60	39,88	60,85
frame 133_aft	338,24	24,65	43,45
frame 133_fore	338,24	118,10	118,10
frame 141	344,64	70,17	70,17
frame 149	351,04	46,40	46,40
frame 157	357,44	20,47	20,47

U kartici *properties* ulazne datoteke programa DYANA sadržane su sve geometrijske značajke presjeka potrebne za daljnji proračun.

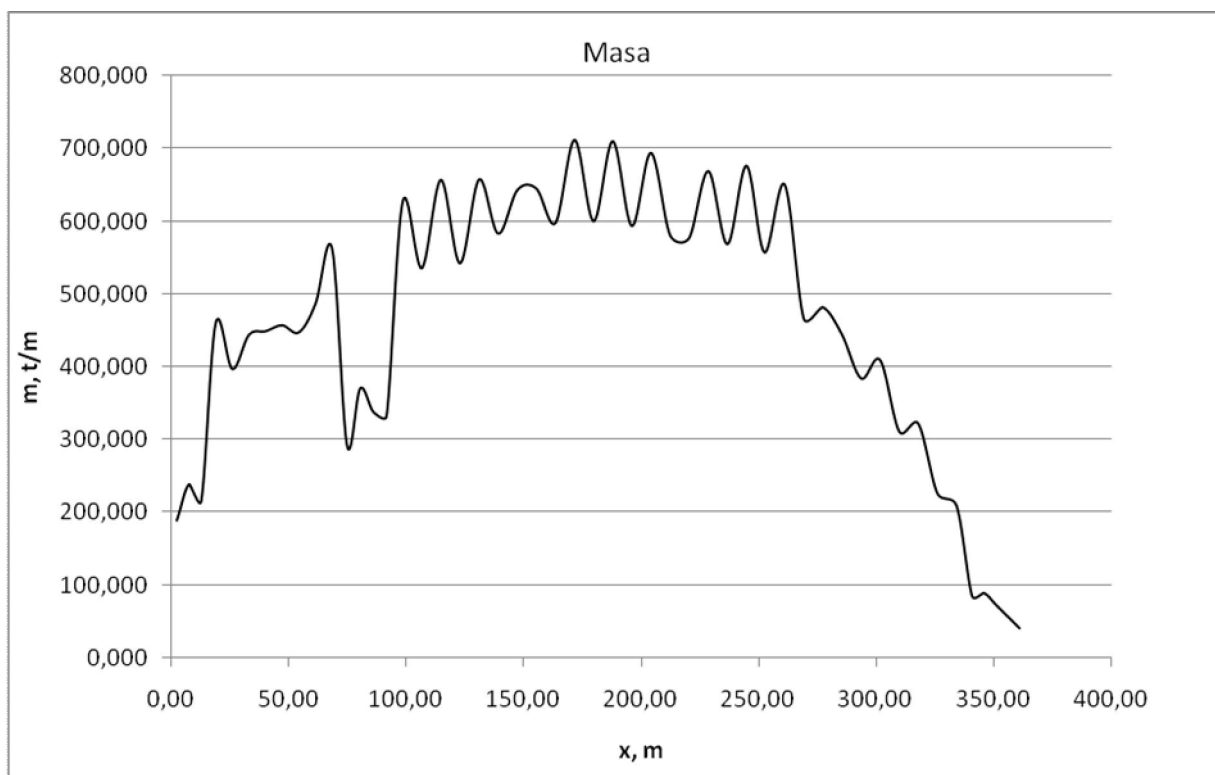
3.3. Inercijske značajke broda

Inercijske značajke grednog modela uključuju masu i momente tromosti mase. U ulaznu datoteku se zadaju mase lakog broda i stavki tereta za odabrano stanje krcanja. Neke od stavki lakog broda (npr. brodski motor) se mogu svrstati u teret radi preciznijeg modeliranja razdiobe mase. Zadanu masu program DYANA raspoređuje po konačnim elementima korištenjem trapeznog pravila. Preduvjet primjene trapeznog pravila je da je težište mase u srednjoj trećini izmeću pramnih i krmenih koordinata.

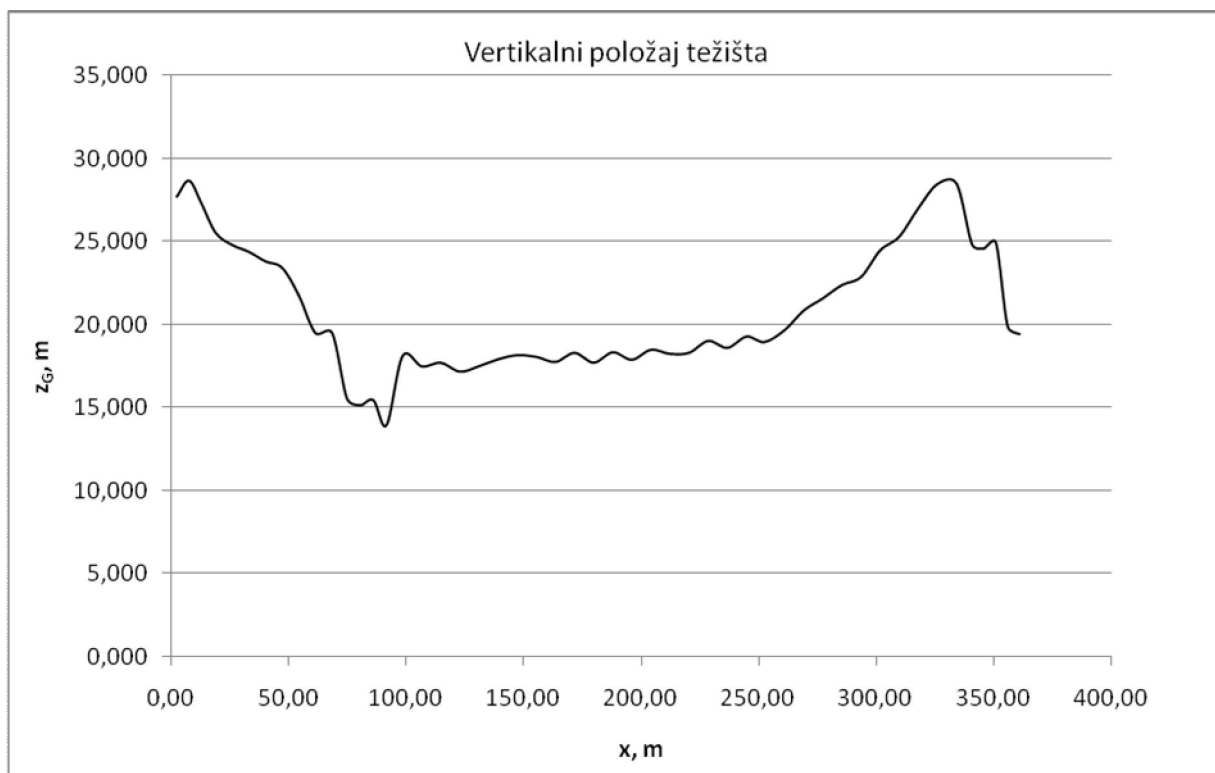
Razdioba mase lakog broda se uzima iz Knjige trim i stabiliteta. Osim mase pojedine stavke potrebno je navesti njezinu početnu i krajnju uzdužnu koordinatu te uzdužnu koordinatu težišta. Program DYANA zadane stavke mase homogeno raspodjeljuje po konačnim elementima.

Pod teretom se podrazumijevaju teret, balast i zalihe, a ponekad i dijelovi lakog broda kao što su motor i grotleni poklopci. Osim mase i koordinata svake stavke tereta, potrebno je navesti i prethodno izračunate momente tromosti mase oko osi kroz težište. Momenti tromosti mase tereta za konačne elemente dobivaju se sumiranjem odgovarajućih veličina po stavkama tereta.

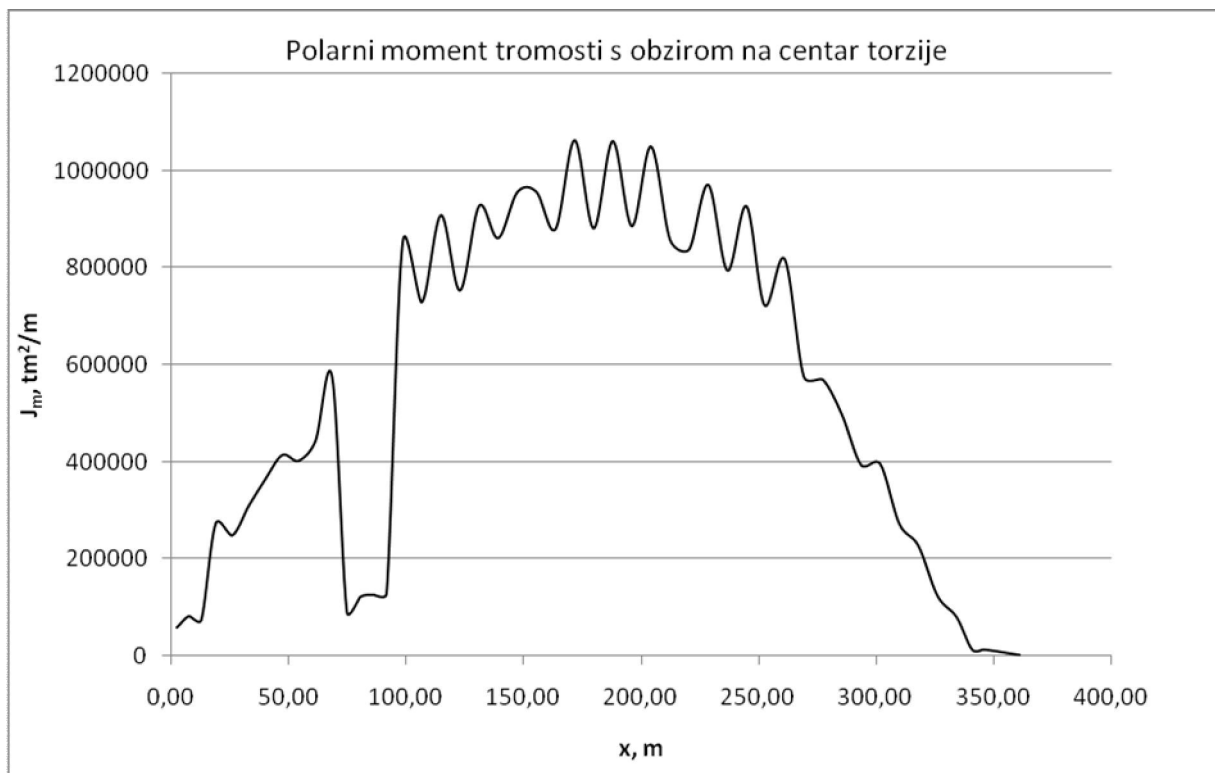
Ukupne inercijske značajke za pojedini konačni element se dobivaju sumiranjem zasebnih vrijednosti izračunatih za masu lakog broda i masu tereta. Njihova raspodjela po dužini broda za odabrano stanje krcanja je pokazana u dijagramima.



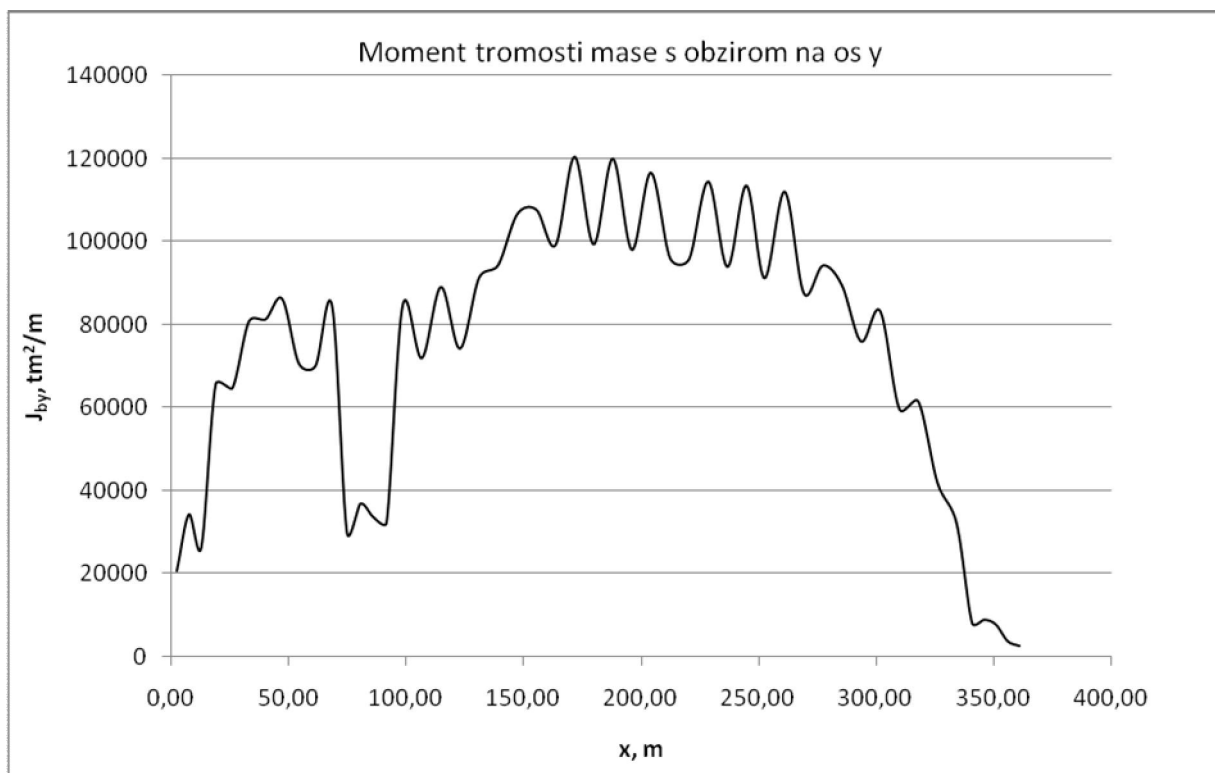
Slika 3.3.1 Raspodjela mase nakrcanog broda



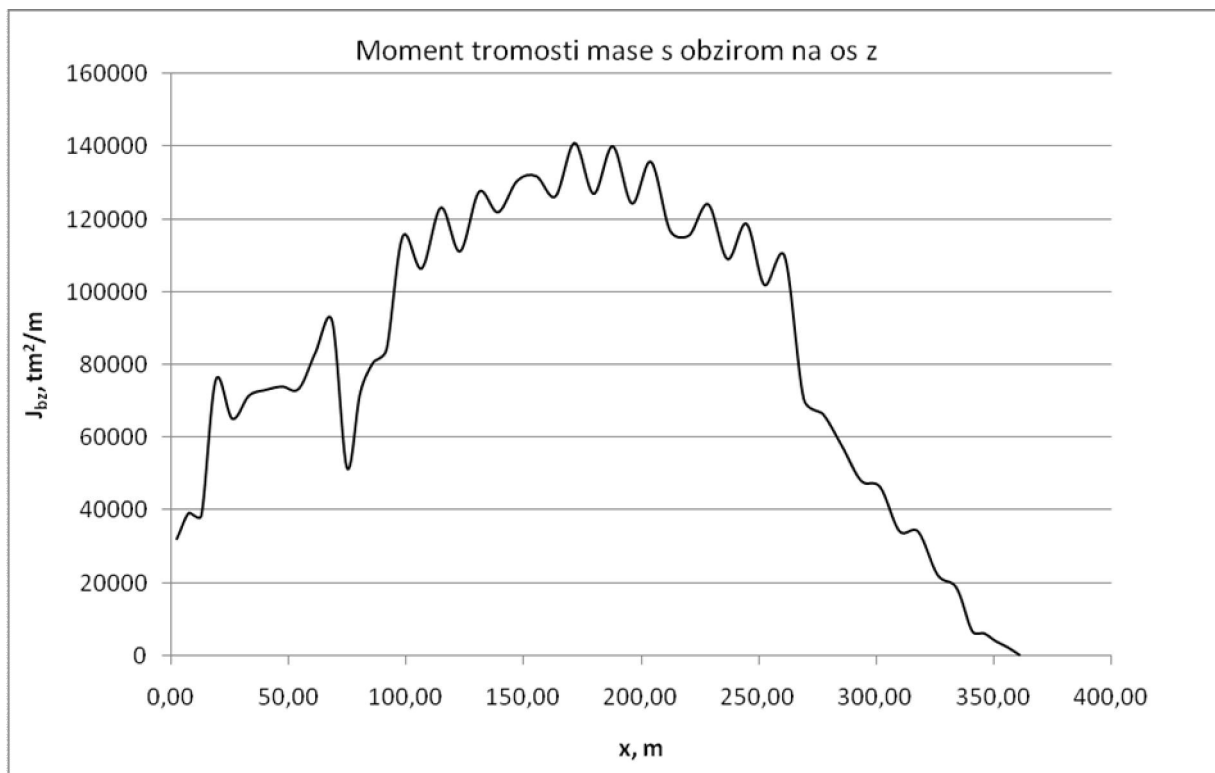
Slika 3.3.2 Vertikalni položaj težišta nakrcanog broda



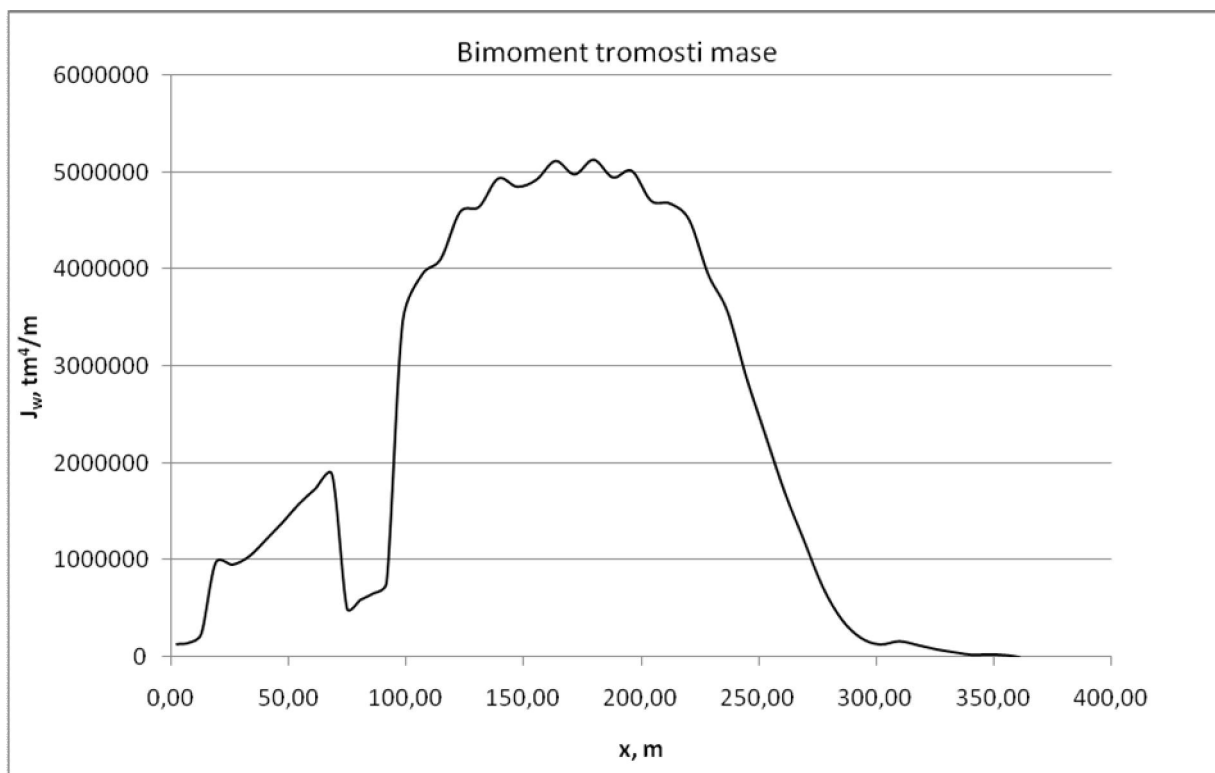
Slika 3.3.3 Raspodjela polarnog momenta tromosti nakrcanog broda s obzirom na centar torzije



Slika 3.3.4 Raspodjela momenta tromosti mase nakrcanog broda s obzirom na os y



Slika 3.3.5 Raspodjela momenta tromosti mase nakrcanog broda s obzirom na os z



Slika 3.3.6 Raspodjela bimomenta tromosti mase nakrcanog broda

3.4. Prirodni oblici vibriranja u zraku

U slučaju prirodnih vibracija, utjecaj prigušenja je neznatan i može se zanemariti. Tako da matrica na jednadžba prirodnih vibracija u zraku glasi:

$$([K] - \Omega^2 [M])\{\delta\} = \{0\}$$

$[K]$ – matrica krutosti

$[M]$ – matrica masa

Ω – prirodna frekvencija

$\{\delta\}$ – vektor pomaka u čvorovima

Za ovaj problem vlastitih vrijednosti za svaki oblik vibriranja dobivaju se Ω_i i δ_i pa se može napisati matrica prirodnih oblika vibriranja, modalna krutost i modalna masa [7]:

$$[\delta] = [\{\delta\}_1, \{\delta\}_2, \dots, \{\delta\}_N]$$

$$[k] = [\delta]^T [K] [\delta]$$

$$[m] = [\delta]^T [M] [\delta]$$

Pri 1D analizi, prirodni oblici vibriranja grede se prenose na slobodnu površinu prema sljedećim izrazima [8].

Vertikalne vibracije:

$$\mathbf{h}_i = -\frac{dw_{vi}}{dx}(z - z_N)\mathbf{i} + w_{vi}\mathbf{k}$$

Torzijske vibracije:

$$\mathbf{h}_i = \left(-\frac{dw_{hi}}{dx}y + \frac{d\psi_i}{dx}u \right)\mathbf{i} + [w_{hi} + \psi_i(z - z_s)]\mathbf{j} - \psi_i y\mathbf{k}$$

w – pomak trupa

ψ – kut uvijanja

y, z – koordinate točke na oplakanoj površini

z_N – vertikalna koordinata neutralne linije

z_s – vertikalna koordinata centra torzije

$\bar{u} = \bar{u}(x, y, z)$ - funkcija vitoperenja presjeka

Za veliki broj stupnjeva slobode, problem vlastitih vrijednosti je nemoguće egzaktno riješiti pa se pribjegava numeričkim metodama. Alat za računanje prirodnih vibracija u ovom slučaju je program DYANA.

Rezultati analize prirodnih vibracija u zraku za 1D model konačnih elemenata i zadano stanje krcanja mogu se kontrolirati usporedbom s postojećim rezultatima 3D analize provedene programom FEMAP-NASTRAN. U Tablici 3.4.1 je prikazana usporedba za prva tri prirodna oblika vibriranja.

Tablica 3.4.1. Usporedba prirodnih oblika vibracija u zraku za 1D i 3D FEM model

Prirodne vibracije u zraku, Hz						
	1D		3D		razlika, %	
	vertikalne	spregnute	vertikalne	spregnute	vertikalne	spregnute
1. prirodni oblik	0,586	0,306	0,586	0,328	0,00	-6,71
2. prirodni oblik	1,220	0,504	1,159	0,470	5,26	7,23
3. prirodni oblik	1,918	0,781	1,962	0,792	-2,24	-1,39

4. HIDROSTATI KI MODEL

4.1. Hidrostati ka krutost

Hidroelasti na analiza se provodi modalnom superpozicijom. Modalne sile predstavljaju utjecaj statičkih i dinamičkih sila na kruto tijelo i elastičnih pomaka za pojedine oblike vibriranja. Povratne modalne sile se sastoje od modalnih sila tlaka i modalnih gravitacijskih sila. Povratna krutost se tako sastoji od hidrostatičkog i gravitacijskog člana. Kako bi se odredila hidrostatička krutost ovisna o tlaku, potrebno je odrediti generaliziranu hidrostatičku silu kao razliku rada tlaka za trenutni i početni položaj broda.

$$F^h = -\rho g \iint_S \tilde{Z} \tilde{\mathbf{H}} \tilde{\mathbf{n}} d\tilde{S} + \rho g \iint_S Z \mathbf{H} \mathbf{n} dS$$

$Z = Z(x, y)$ – vertikalna koordinata oplakane površine

\mathbf{n} – vektor normale

\mathbf{H} – vektor pomaka

Zanemarivanjem članova neznatne vrijednosti, izraz se može svesti na:

$$F^h = -\rho g \iint_S (\delta Z \mathbf{H} \mathbf{n} + Z \delta \mathbf{H} \mathbf{n} + Z \mathbf{H} \delta \mathbf{n}) dS$$

Varijacije pojedinih veličina se mogu definirati uvođenjem usmjerene derivacije:

$$\delta Z = (\mathbf{H} \nabla) Z = H_z$$

$$\delta \mathbf{H} = (\mathbf{H} \nabla) \mathbf{H}$$

$$\delta \mathbf{n} = (\mathbf{H} \nabla) \mathbf{n}$$

Ovaj način određivanja $\delta \mathbf{n}$ je prilično složen pa je prikladnije koristiti izraz koji uključuje derivacije pomaka:

$$\mathbf{H} \delta \mathbf{n} = \mathbf{H} \mathbf{n} (\nabla \mathbf{H}) - \mathbf{n} (\mathbf{H} \nabla) \mathbf{H}$$

Nakon uvrštavanja zamjenskih izraza u izraz za silu dobije se:

$$F^h = -\rho g \iint_S [H_z + Z(\nabla \mathbf{H})] \mathbf{H} \mathbf{n} dS$$

Prema definiciji, krutost je odnos izme u sile i pomaka i odre uje se preko diferencijalne jedna dbe:

$$\delta F^h = -\rho g \iint_S [H_z + Z(\nabla \mathbf{H})] \delta \mathbf{H} \mathbf{n} dS$$

Za modalne sile i pomake vrijedi:

$$\delta F^h = \sum_{j=1}^N \delta F_j^h$$

$$\mathbf{H} = \sum_{j=1}^N \xi_j \mathbf{h}_j$$

$$\delta \mathbf{H} = \sum_{j=1}^N \delta \xi_j \mathbf{h}_j$$

Varijacijska jedna dba sile se mo e rastaviti na modalne jedna dbe:

$$\delta F_i^h = -\sum_{j=1}^N [(C_{ij}^p + C_{ij}^{nh}) \xi_j] \delta \xi_i$$

$$C_{ij}^p = \rho g \iint_S \mathbf{h}_i h_z^j \mathbf{n} dS \quad - \text{koeficijenti krutost uslijed promjene tlaka}$$

$$C_{ij}^{nh} = \rho g \iint_S Z \mathbf{h}_i (\nabla \mathbf{h}_j) \mathbf{n} dS \quad - \text{koeficijenti krutosti uslijed promjene normalnog vektora i}$$

vektora oblika

4.2. Gravitacijska krutost

Generalizirana gravitacijska sila:

$$F^m = -g \iiint_{\tilde{V}} \tilde{\rho}_s \tilde{H}_z d\tilde{V} + g \iiint_V \rho_s H_z dV = -g \iiint_V \rho_s \delta H_z dV$$

s – strukturna gusto a

Primjenom usmjerene derivacije dobije se:

$$F^m = -g \iiint_V \rho_s (\mathbf{H} \nabla) H_z dV$$

Varijacijska jednačba:

$$\delta F^m = -g \iiint_V \rho_s (\delta \mathbf{H} \nabla) H_z dV$$

Primjenom metode superpozicije dobiva se modalna varijacijska jednačba:

$$\delta F_i^m = - \sum_{j=1}^N C_{ij}^m \xi_j \delta \xi_i$$

$$C_{ij}^m = g \iiint_V \rho_s (\mathbf{h}_i \nabla) h_z^j dV \quad - \text{koeficijenti gravitacijske krutosti}$$

4.3. Povratna krutost

Koeficijenti ukupne povratne krutosti se dobivaju kao zbroj sastavnih dijelova.

$$C_{ij} = C_{ij}^p + C_{ij}^{nh} + C_{ij}^m$$

$$C_{ij}^p = \rho g \iint_S (h_x^i n_x + h_y^i n_y + h_z^i n_z) h_z^j dS$$

$$C_{ij}^{nh} = \rho g \iint_S Z (h_x^i n_x + h_y^i n_y + h_z^i n_z) \left(\frac{\partial h_x^j}{\partial x} + \frac{\partial h_y^j}{\partial y} + \frac{\partial h_z^j}{\partial z} \right) dS$$

$$C_{ij}^m = g \iiint_V \rho_s \left(h_x^i \frac{\partial h_z^j}{\partial x} + h_y^i \frac{\partial h_z^j}{\partial y} + h_z^i \frac{\partial h_z^j}{\partial z} \right) dV$$

Ra unanje koeficijenata povratne krutosti se vrši programom DYANA.

5. HIDRODINAMI KI MODEL

5.1. Teoretski pregled

Harmonijski hidroelasti ni problem se razmatra u frekvencijskoj domeni i u obzir uzima amplitude sile i pomaka. Ukupna hidrodinami ka sila F^h se može rastaviti na dva lana: F^R koji ovisi o deformacijama strukture i F^{DI} koji predstavlja istu uzbudu.

$$F^h = F^R + F^{DI}$$

Vektor deformacija oplakane površine $\mathbf{H}(x, y, z)$ se može prikazati kao skup prirodnih oblika vibriranja u zraku $\mathbf{h}_i(x, y, z)$.

$$\mathbf{H}(x, y, z) = \sum_{i=1}^N \xi_i \mathbf{h}_i(x, y, z) = \sum_{i=1}^N \xi_i [h_x^i(x, y, z)\mathbf{i} + h_y^i(x, y, z)\mathbf{j} + h_z^i(x, y, z)\mathbf{k}]$$

ξ_i – nepoznati koeficijenti

Ovaj hidrodinami ki model pretpostavlja da vrijedi potencijalna teorija i da se potencijal brzine može izraziti Laplaceovom jednađbom uz poznate rubne uvjete.

$$\Delta\varphi = 0 \quad \text{- unutar fluida}$$

$$-\nu\varphi + \frac{\partial\varphi}{\partial z} = 0 \quad \text{- na slobodnoj površini}$$

$$\frac{\partial\varphi}{\partial n} = -i\omega\mathbf{H}\mathbf{n} \quad \text{- na oplakanoj površini}$$

$$\nu = \frac{\omega^2}{g} \text{ - valni broj}$$

ω – valna frekvencija

\mathbf{n} – vektor normale oplakane površine

i – imaginarna jedinica

Prema linearnoj valnoj teoriji mogu e je rastaviti ukupni potencijal:

$$\varphi = \varphi_I + \varphi_D - i\omega \sum_{j=1}^N \xi_j \varphi_{Rj}$$

$$\varphi_I = -i \frac{gA}{\omega} e^{V(z+ix)}$$

I – potencijal nailaznog vala

D – difrakcijski valni potencijal

R_j – radijacijski potencijal

A – valna amplituda

Rubni se uvjeti mogu raspisati za svaki od potencijala:

$$\frac{\partial \varphi_D}{\partial n} = -\frac{\partial \varphi_I}{\partial n}$$

$$\frac{\partial \varphi_{Rj}}{\partial n} = \mathbf{h}_j \cdot \mathbf{n}$$

Hidrodinamičke sile se određuju integracijom rada tlaka po oplakanoj površini. Tlak se dobiva iz Bernoullijeve jednadžbe:

$$p = i\omega\rho\varphi - \rho gz$$

Izraz koji se odnosi na potencijal brzine se može razlučiti na izraz uzbude i izraz radijacije.

$$F_i^{DI} = i\omega\rho \iint_S (\varphi_I + \varphi_D) \mathbf{h}_i \cdot \mathbf{n} dS$$

$$F_i^R = \omega^2 \rho \sum_{j=1}^N \xi_j \iint_S \varphi_{Rj} \mathbf{h}_i \cdot \mathbf{n} dS$$

Prvi izraz se odnosi na modalnu uzbudu tlaka. Radijacijski dio se pak može rastaviti na modalnu silu inercije i silu prigušenja.

$$F_i^a = \text{Re}(F_i^R) = \omega^2 \sum_{j=1}^N \xi_j A_{ij}$$

$$A_{ij} = \rho \text{Re} \iint_S \varphi_{Rj} \mathbf{h}_i \cdot \mathbf{n} dS$$

$$F_i^v = \text{Im}(F_i^R) = \omega \sum_{j=1}^N \xi_j B_{ij}$$

$$B_{ij} = \rho \omega \operatorname{Im} \iint \varphi_{Rj} \mathbf{h}_i \mathbf{n} dS$$

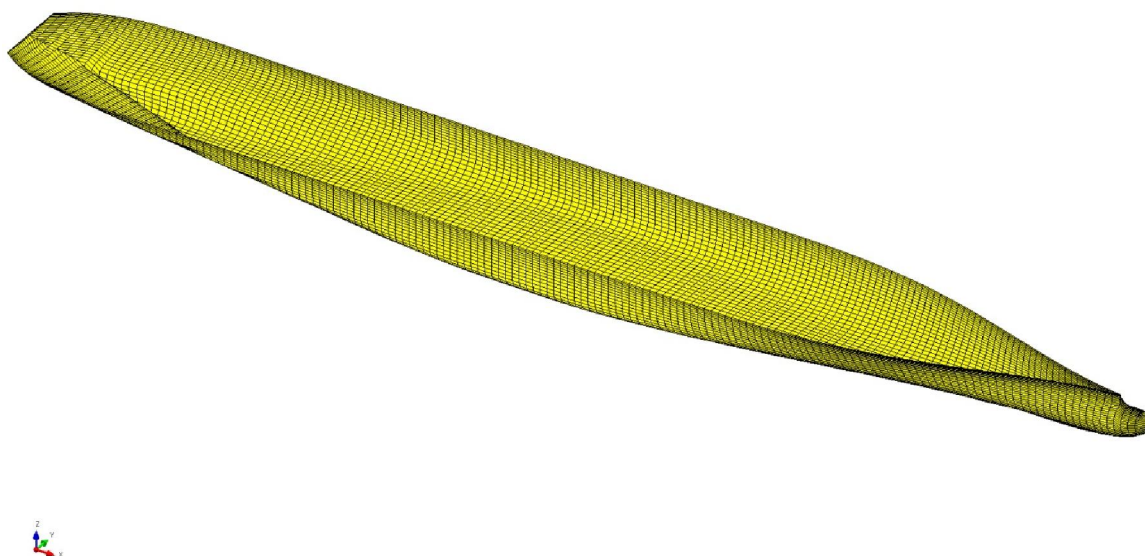
A_{ij} – elementi matrice dodane mase

B_{ij} – elementi matrice prigušenja

Budući da ne postoji potpuno egzaktno i pouzdano na in rješavanje hidrodinamičkog problema, u upotrebi su različite aproksimacije. Program FMOLOH (Flexible Modelling of Loads in Hydrodynamics) koji je ovdje korišten za rješavanje problema rubnih vrijednosti koristi metodu susretne frekvencije za određivanje rubnih vrijednosti na slobodnoj površini, a metodu rubnih integralnih jednačbi za rješavanje radijacijsko-difrakcijskog problema.

5.2. Mreža hidrodinamičkog modela

Ovisno o frekvencijskom području unutar kojega se želi postići i zadovoljavajuća točnost (hidroelastičkog) odziva, prvi korak u sklapanju ulazne datoteke hidrodinamičkog modela predstavlja stvaranje dovoljno guste mreže oplakane površine. Za generiranje mreže korišten je program AMG (Automatic Mesh Generation). Taj program kao izlaznu datoteku daje potpuni oblik ulazne datoteke hidrodinamičkog modela.



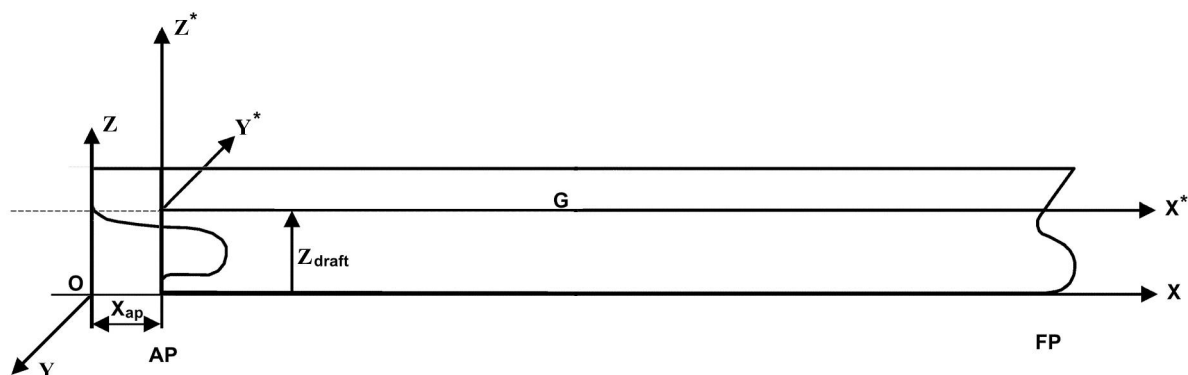
Slika 5.2.1 Hidrodinamička mreža prikazana u programu MGVS (Mesh Generation & Visualisation)

Ovisno o frekvencijskom području unutar kojega se želi postići i zadovoljavajuća točnost (hidroelastičnog) odziva, potrebno je stvoriti mrežu dovoljne gustoće. Može se pretpostaviti kako duljina 6 panela hidrodinamičkog modela približno odgovara valnoj duljini za koju se može izračunati dostatno precizan odziv.

5.3. Sprezanje strukturnog i hidrodinamičkog modela

Sprezanje strukturnog i hidrodinamičkog modela provodi se u programu DYANA prenošenjem odgovarajućih površinskih pomaka 1D modela konačnih elemenata u pomake u točkama 3D modela rubnih elemenata.

Strukturni je model definiran u lijevakretnom koordinatnom sustavu OXYZ s ishodištem na presjeku krme i osnovke broda, a hidrodinamički u desnokretnom koordinatnom sustavu $G X^* Y^* Z^*$ kojem je ishodište smješteno u razini vodne linije na stražnjoj okomici.



Slika 5.3.1 Koordinatni sustavi strukturnog i hidrodinamičkog modela

Sprezanje se u modelima ostvaruje se raspršivanjem pomaka grednog modela na pomake točke na oplakanoj površini broda za pojedine oblike vibriranja. Pri tome se, kako bi se dobio odgovarajući vektor grednih pomaka u vektoru j , a na temelju uzdužne koordinate točke unutar strukturnog modela, provodi interpolacija funkcijama oblika između susjednih vrijednosti površinskih pomaka.

6. HIDROELASTI NI MODEL

Hidroelasti ni model se sastoji od modalnih hidrodinami kih, hidrostati kih i gravitacijskih sila nametnutih strukturnom modelu.

$$(k - \omega^2 m) \xi = F^{DI} + F^a + F^v + F^H + F^m$$

lanovi koji sadrže nepoznate modalne amplitude i se mogu prebaciti na lijevu stranu i može se napisati matri na diferencijalna jednadžba brodskih gibanja i vibracija:

$$[k + C - i\omega(d + B(\omega)) - \omega^2(m + A(\omega))] = F$$

k – strukturna krutost

d – strukturno prigušenje

m – strukturna masa

C – povratna krutost

B () – hidrodinami ko prigušenje

A () – dodana masa

– modalne amplitude

F – valna uzbuda

– susretna frekvencija

Strukturno prigušenje se može odrediti kao postotak kriti ne vrijednosti prema iskustvu, a dodana masa i hidrodinami ko prigušenje ovise o frekvenciji. Rješenje ove diferencijalne jednadžbe daje modalne amplitude .

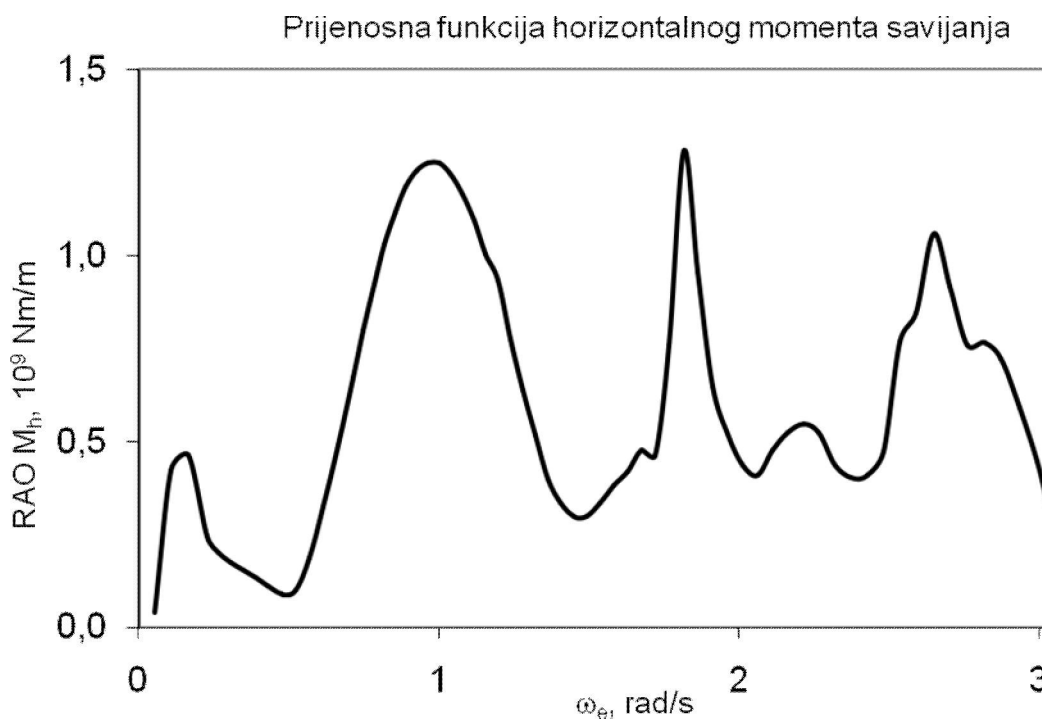
Prirodni oblici vibriranja u vodi se mogu dobiti rješavanjem problema vlastitih vrijednosti:

$$[k + C - \omega^2(m + A(\omega))] = 0$$

Prigušenje se može zanemariti jer je njegov utjecaj vrlo mali. Budu i da je dodana masa ovisna o frekvenciji, potrebno je koristiti metodu iteracije. Za rješavanje ovog problema korišten je program MECAP (Motion Equation Calculation and Postprocessing). Umjesto iteracije program koristi metodu približnog odre ivanja prirodnih frekvencija u vodi traženjem presjecišta krivulje “prirodnih frekvencija” izra unatih za unaprijed odabrane valne frekvencije i pravca „omega.natural=omega.encounter“ pod kutem od 45°.

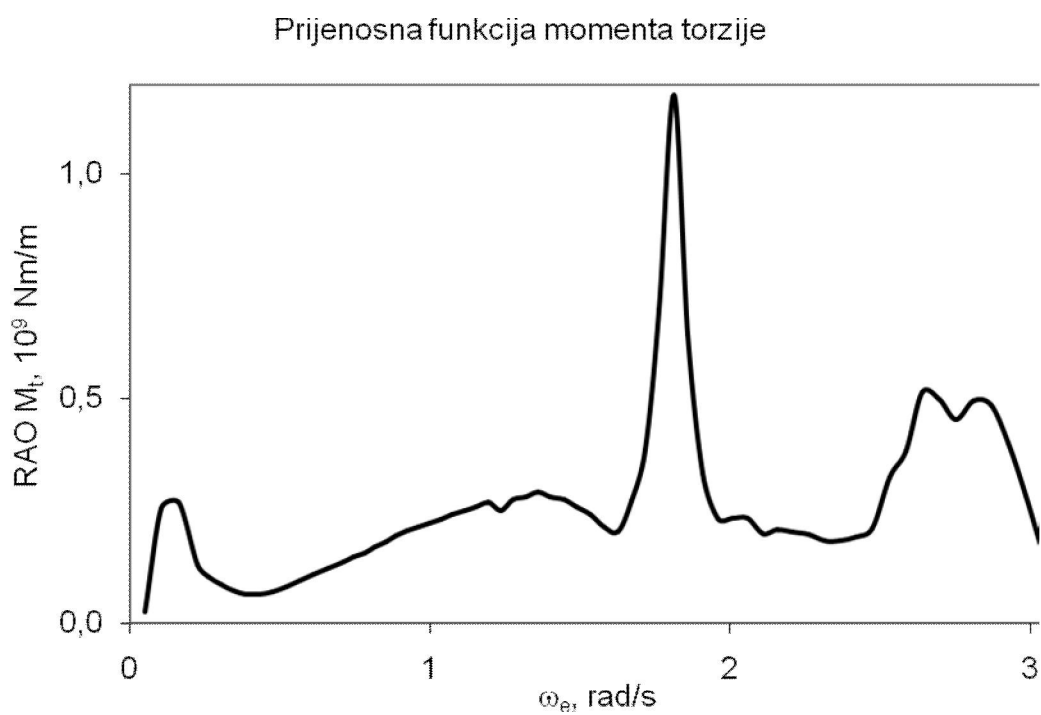
7. PRORA UN PRIJENOSNIH FUNKCIJA

Numerički proraun prijenosnih funkcija je izvršen u programu MECAP (Motion Equation Calculation and Postprocessing). U proraunu je uzet kut nailaska valova $\beta = 120^\circ$ i $\beta = 180^\circ$. Prijenosne funkcije su izračunate za presjek oko sredine broda, na 179,85 m od krmene okomice, pri brzini od 24,7 čvorova, za potpuno nakrcan brod.

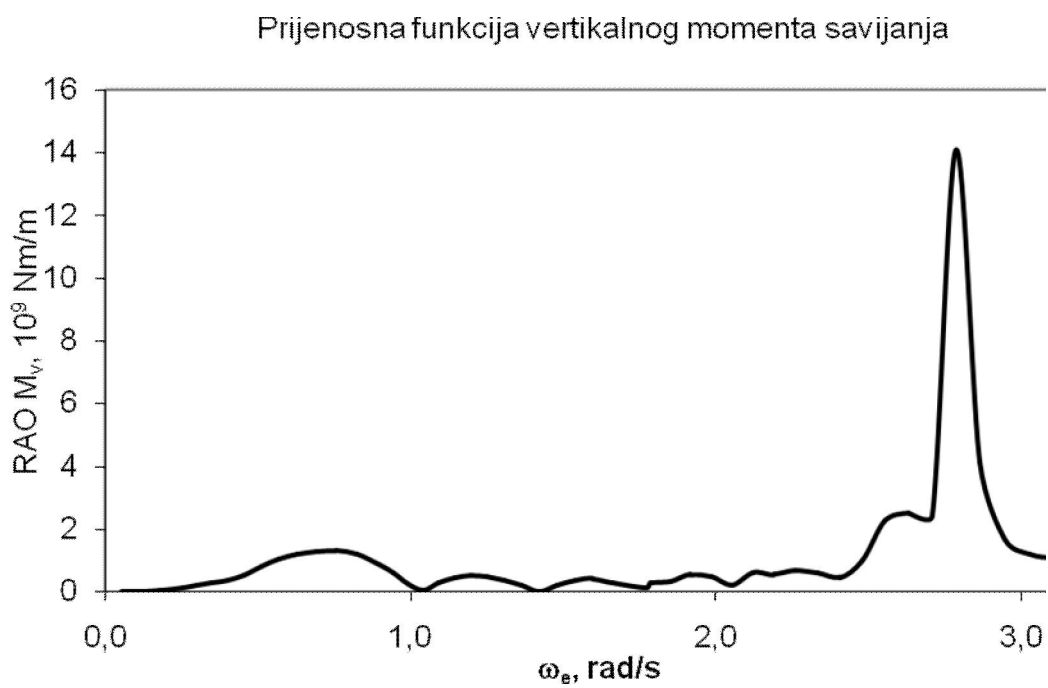


Slika 7.1 Prijenosna funkcija horizontalnog momenta savijanja

Horizontalni i torzijski moment savijanja su računati za $\beta = 120^\circ$ jer plovidba koso na valove izaziva velike spregnute horizontalne i torzijske vibracije pa je to najnepovoljniji slučaj. Za vertikalni moment savijanja najnepovoljniji slučaj je plovidba pramcem na valove pod kutem $\beta = 180^\circ$.



Slika 7.2 Prijenosna funkcija momenta torzije

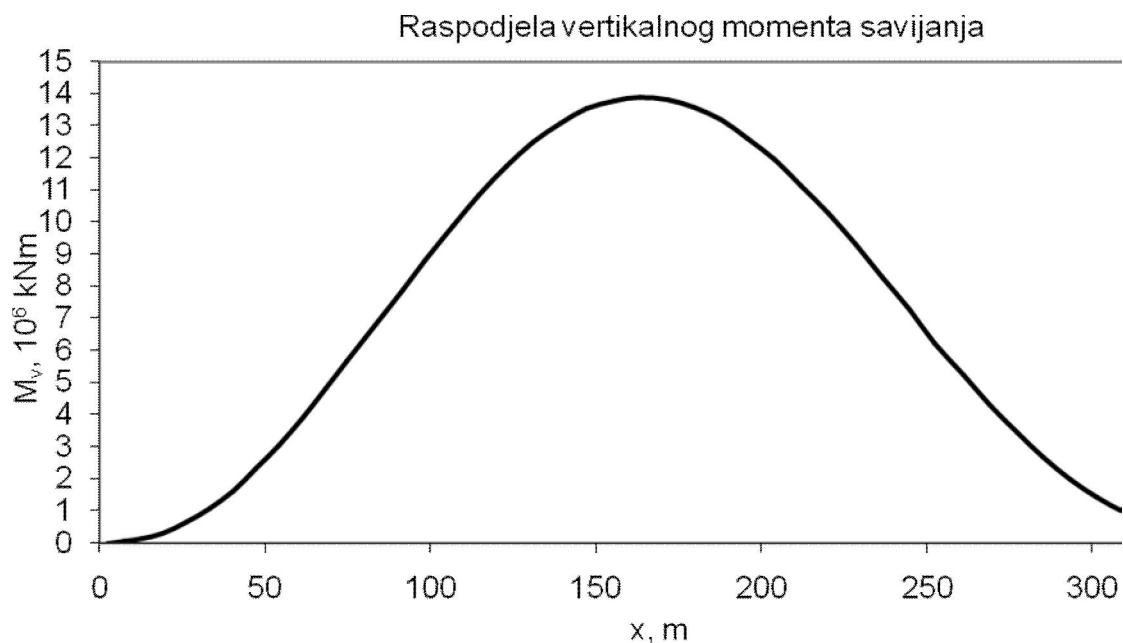


Slika 7.3 Prijenosna funkcija vertikalnog momenta savijanja

8. PRORA UN ODZIVA ZA ODREĐENO STANJE MORA

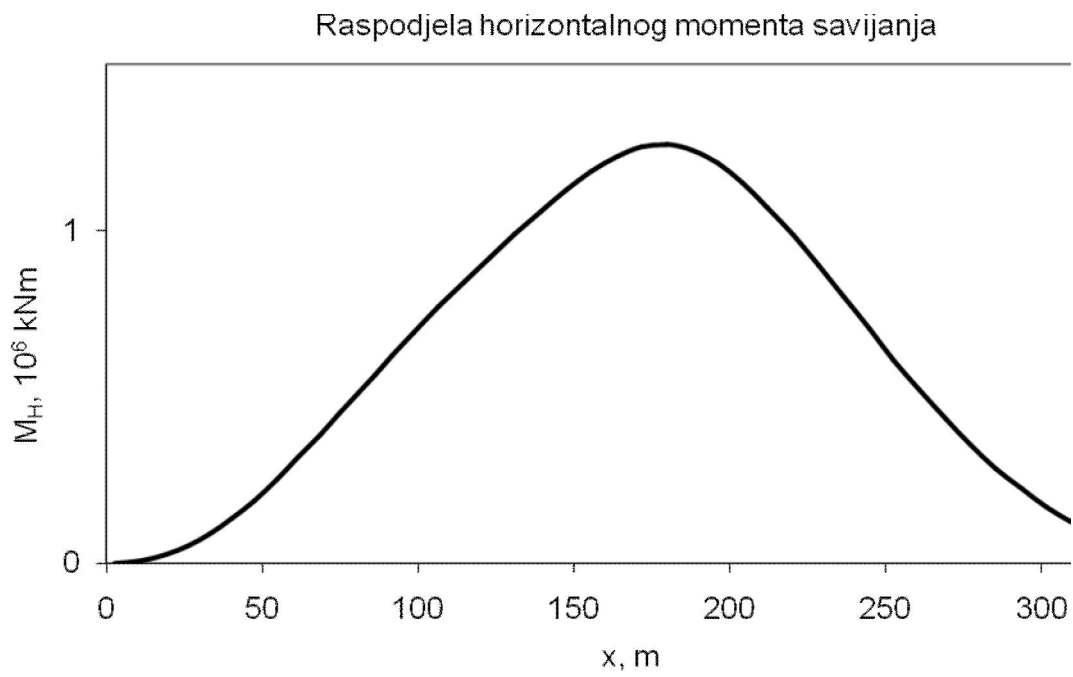
Odziv broda za 100 frekvencija valova i dva susretna kuta proračunat je u programu MECAP.

Vertikalni moment savijanja je najveći pri plovidbi s valovima u pramac. Na slijedećem dijagramu je prikazana raspodjela momenta pri susretnoj frekvenciji $\omega_e = 2,78 \text{ rad/s}$ što odgovara prvom prirodnom obliku vertikalnih vibracija. Budući da u zadatku diplomskog rada nije zadano stanje mora, odziv je računat za harmonijski val, valne visine 2 m, kako je originalna postavka programa Hydrostar i MECAP.



Slika 8.1 Raspodjela vertikalnog momenta savijanja, $H = 2 \text{ m}$, $\omega_e = 1,13 \text{ rad/s}$, $L = 48,27 \text{ m}$

Prva prirodna frekvencija spregnutih horizontalnih i torzijskih vibracija je $\omega_1 = 1,81 \text{ rad/s}$. Raspodjela horizontalnog momenta savijanja pri toj susretnoj frekvenciji je prikazana na slijedećem dijagramu.



Slika 8.2 Raspodjela horizontalnog momenta savijanja, $H = 2 \text{ m}$, $\omega = 1,07 \text{ rad/s}$, $\lambda = 53,84 \text{ m}$

9. ZAKLJUČAK

Veliki kontejnerski brodovi na moru doživljavaju velike deformacije koje nisu predviđene pravilima klasifikacijskih društava. Zbog toga je nužno provesti hidroelastičnu analizu takvih brodova.

Usporedba prirodnih oblika vibriranja dobivenih hidroelastičnom analizom koja koristi 1D FEM strukturni model i onih dobivenih proračunom pomoću programa FEMAP-NASTRAN koji koristi 3D FEM model pokazuje da je 1D gredni model dovoljno točan i pouzdan za preliminarni proračun. Ipak, u kasnijim fazama projektiranja bi bilo poželjno uvesti i analizu 3D modela.

Hidroelastična analiza daje dobre rezultate sila i momenata za odabrane frekvencije kao i prijenosne funkcije koje se mogu dalje koristiti u analizi gibanja broda za različita stanja mora.

Idući korak koji nije obuhvaćen u ovom radu bi bio naći naprezanja strukture preko poznatih valnih opterećenja. Za takav proračun bi bio nužan 3D model na kojem bi se mogle odrediti kritične zone naprezanja (npr. uglovi grotala) i zamor detalja strukture.

Nakon modelskih testiranja i mjerenja na brodu u naravi, bilo bi moguće zaključiti u kojem smjeru se trebaju proširiti klasifikacijska pravila kako bi u potpunosti jamčila sigurnost velikih kontejnerskih brodova na valovima.

10. POPIS LITERATURE

- [1] Tomašević, S., „Hidroelastični model dinamičkog odziva kontejnerskog broda na valovima“, doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2007.
- [2] Senjanović, I., Malenica, Š., Tomašević, S., „Investigation of ship hydroelasticity“, Ocean Engineering, Vol.35 (2008) 5-6, 523-535
- [3] Senjanović, I., Tomašević, S., Vladimir, N., „An advanced theory of thin-walled girders with application to ship vibrations“, Marine Structures (2009), doi:10.1016/j.marstruc.2009.03.004
- [4] Senjanović, I., Fan, Y., „STIFF, User's manual“, FSB, Zagreb, 1990.
- [5] Tomašević, S., „HYELACS, HYdroELastic Analysis of Container Ships, Hidroelastična analiza kontejnerskih brodova, Korisnički priručnik“, FSB, Zagreb, 2009
- [6] Senjanović, I., Tomašević, S., Rudan, S., Senjanović, T., „Role of transverse bulkheads in hull stiffness of large container ships“, Engineering Structures 30 (2008) 2492-2509
- [7] Senjanović, I., „Metoda konačnih elemenata u brodskim konstrukcijama“, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1998.
- [8] Senjanović, I., Tomašević, S., Rudan, S., Tomić, M., Vladimir, N., Malenica, Š., „Hydroelasticity of very large container ships“, International Conference Design & Operation of Container Ships, RINA, London, 2008.
- [9] Bishop, R.E.D., Price, W.G., „Hydroelasticity of Ships“, Cambridge University Press, 1979.